

レーザー光源プロジェクトにおけるスペックルの解析と低減に関する研究

著者	倉富 雄平
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4276号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61800

氏 名	くらとみゆうへい 倉富 雄平
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	レーザー光源プロジェクトにおける スペックルの解析と低減に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 内田 龍男
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 内田 龍男 東北大学教授 川又 政征 東北大学教授 中沢 正隆 東北大学特任教授 鈴木 芳人 東北大学客員准教授 川上 徹 東北大学客員准教授 関家 一雄

論文内容要旨

リアプロジェクションディスプレイの光源としてレーザーを用いることによって、発光効率の向上、光学系の小型化、表示色範囲の拡大などが期待されている。しかし、レーザー光源を用いると、スクリーンなどの拡散板によって拡散されたレーザー光がスペックルと呼ばれる砂地模様の明暗の干渉パターンが発生させ、表示品位を著しく低下させることが問題となる。したがって、レーザー光源を用いたリアプロジェクションディスプレイの実用化に当たっては、スペックルの低減が強く望まれている。しかし、スペックル発生の詳細な機構は明らかにされておらず明確な低減法が確立されていない。そこで本研究はこの問題を解決するために、スペックルの発生機構を解明し、その低減を試みたものである。

第 1 章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べた。

第 2 章では、スペックルの発生モデルについて検討した。従来広く用いられてきたスペックルの発生モデルとしては、スペックルを構成する拡散光が互いに独立した無数のランダムな位相と振幅を持つ要素から構成されるとし、発生するスペックルの強度分布を統計的にモデル化したものである。しかしこのモデルにはスペックルが実際に発生するまでの物理的なプロセスに関する記述がないため、実際の光学系において発生するスペックルの解析に用いることはできない。そこで本研究では、スペックルは光の干渉であるという物理現象を出発点とし、スペックルの発生に関する物理モデルの確立を行った。

研究で用いた光学系としては、スペックル低減に対し最も実用的で有効な方式の一つとして考えられている、小型拡散板をマイクロディスプレイデバイスと共役な位置に配置し揺動させる方式 (小型拡散板方式) を基本とした。スペックル発生の基本モデルとして、2 つの拡散点からの拡散光が空中に多数の干渉輝点を発生させることを示し、さらに拡散点の数を無数に増やした拡張モデルを構築した (空中輝点モデル)。このモデルをもとに、小型拡散板方式におけるスペックルの発生機構について解析を行った。通常のスペックルパターンは細かい粒状の明暗パターンのみが現れるのに対し、小型拡散板方式のスペックルの場合、細かい明暗パターンに加え粗い明暗パターンが重畳し現れることがわかった。この異なる粗さのパターンの発生に着目し、先に述べた空中輝点モデルを用いてスペックルの発生箇所について解析を行った。具体的には、測定レンズの焦点位置を変化させた際

のスペックルパターンの変化を観測することによって、細かいパターンと粗いパターンそれぞれの発生箇所の特
定を試みた。この結果、発生したスペックルのうち、細かいパターンは小型拡散板で発生するスペックル（1 次
スペックル）であり、粗いパターンはスクリーンで発生するスペックル（2 次スペックル）であること、また両
者を独立して考えることが重要であることを示した（図 1）。

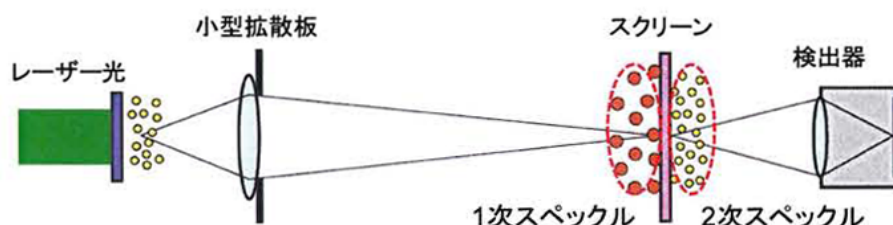


図 1 小型拡散板方式におけるスペックル発生モデル

小型拡散板方式では、小型拡散板の揺動によってスクリーン上で 1 次スペックルパターンが移動する際にスペ
ックル低減効果を発揮するとされている。この効果を詳細に検討するにあたり、はじめにスペックルの明暗パタ
ーンが持つ物理的意味について解析を行った。スペックルパターンは干渉によって発生するため、その明暗パタ
ーンは拡散光の位相変化に対応するはずであると考えた。この仮説を確かめるために、2 つのピンホールを開け
たシートをスクリーンの代わりに設置し、1 次スペックルパターンを移動しながら 2 点間からの光による干渉パ
ターンの変化を測定した。この結果、1 次スペックルパターンが細かいときには、干渉パターンの位置が大きく
シフトすることがわかった。これは 1 次スペックルパターンの移動によって 2 点間の位相差が変化したことを示
す。一方、1 次スペックルパターンが粗いときは、干渉パターンの位置はほぼ変化しないことがわかった。した
がって、これらの実験から、スペックルの明暗パターンは光の位相変化に対応しており、スペックルの明暗パタ
ーンが粗いほど 2 点間の位相差変化が少なくなることを明らかにした。

1 次スペックルパターンが位相変化に対応することは、スペックル低減効果の解析において重要な結果である
ことから、このパターンの粗さに影響する投射光学系のパラメータについて検討した。具体的には、投射光学系
のパラメータである倍率および F ナンバーそれぞれを独立に変化し、得られる 1 次スペックルパターンの変化を
観察した。この結果、光学系の倍率およびレンズの F ナンバーが大きいほど 1 次スペックルパターンが粗くなる
ことを明らかにした。この変化は空中輝点モデルとレンズの基本特性の関係から導出可能であることから、妥当
な結果であることがわかった。

続いて 1 次スペックルパターンの粗さを定量的に表すために、得られたスペックルパターンをフーリエ変換し、
空間周波数特性を求めた。実験で得られた空間周波数特性の最高周波数と、光学系の倍率および F ナンバーの条
件から導かれる理論上の最高周波数を比較したところ、両者がよく一致することを示した。さらに、DC 成分を
除いた空間周波数特性の最低周波数の強度の半値幅を基準とし、あらたにスペックルパターンの粗さを示すパラ
メータとして粒度を定義した。さらに実験によって、投射レンズの倍率または F ナンバーが大きくなるにしたが
い 1 次スペックルパターンの粒度が大きくなることを確認した。

第3章では、第2章の結果を応用し、小型拡散板方式において拡散板を揺動した際のスペックルの低減効果について検討した。この方式は、小型拡散板の1次スペックルパターンがスクリーンの拡散と重畳し、2次スペックルパターンが時間的に平均化されて低減されることをねらったものである。1次スペックルの明暗パターンがその位相変化に対応すると結果から、1次スペックルパターンの粗さが揺動時における単位面積内の実効的な可干渉性に対応すると仮説を立てた。すなわち、1次スペックルの粒度が粗いほど揺動時における単位面積内の位相変化が少なくなるため、その面積内における可干渉性が高くなり、この結果2次スペックルのコントラストが高くなると考えた。

これを確かめるために、2つのピンホールを明けたシートを用い、1次スペックル揺動時に2点間からの光が形成する干渉パターンのコントラスト変化を測定した。1次スペックルの粒度によって可干渉領域が変化すれば、2点間の干渉性が変化し、干渉パターンのコントラストが変化するはずである。実験の結果、1次スペックルが粗いほど、得られた干渉パターンのコントラストが高くなることがわかった。図2の上部のグラフに、横軸にFナンバーをとり、縦軸に対応する1次スペックル粒度をプロットした。さらに代表的な3点を選びそれぞれの粒度における、ピンホール2点間の干渉パターンを下部に示した。粒度が大きくなるにつれ、干渉パターンのコントラストが強くなっていることから、粒度が大きいほど可干渉性領域のサイズが大きくなるとの仮説は確かめられた。さらに、ピンホールの2点間の間隔をグラフ上に横線で示した。この間隔に対応する粒度を境に、2点間の干渉が顕著に起こっていることがわかる。したがって、本研究で定義した粒度は可干渉性領域のサイズと対応することも示された。

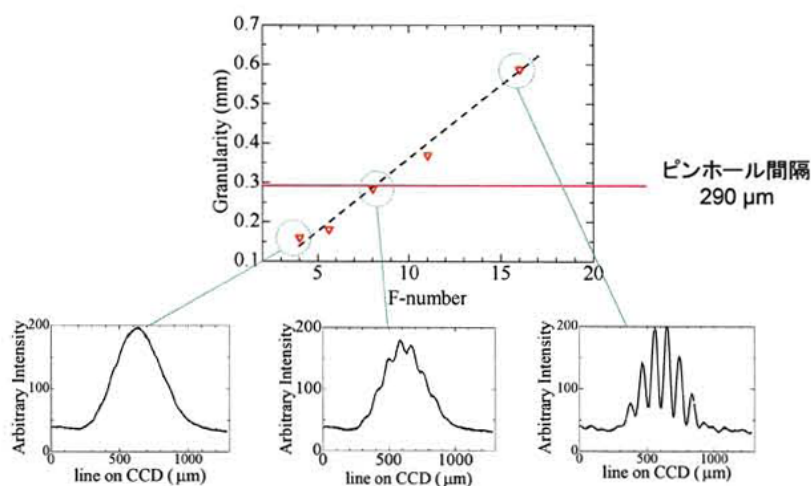


図2 Fナンバーに対する1次スペックルの粒度変化（上部）とピンホール2点間の干渉パターン（下部）

以上の結果から、1次スペックル粒度が小さい場合は、スクリーンにおいて発生する2次スペックルを十分に低減できる効果が得られるが、粒度が大きくなるにつれその効果が弱くなることがわかった。これは、1次スペックルのが粗いときは可干渉領域のサイズが大きいため、結果としてスクリーンにて発生する2次スペックルのコントラストを十分に下げることができなくなるためである。

光学系の倍率、F ナンバー、拡散板の拡散角度特性といった光学系のパラメータを変化させ、それぞれの粒度と2次スペックルのコントラストの対応関係を調べたところ、粒度を基準にすればこれら光学系のパラメータによらず2次スペックルのコントラストを統一的に議論できることを示した(図3)。これは1次スペックル揺動時に、その粒度がスクリーン位置における可干渉性を示すものであるとの先の結論から考えると妥当な結果である。

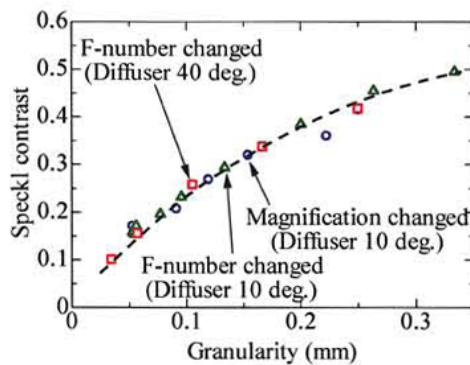


図3 1次スペックル粒度と2次スペックルコントラストの関係

以上の結果にもとづいて小型拡散板方式のスペックル低減効果の限界条件についての検討を行った。2次スペックルのコントラストは1次スペックルの粒度に依存するため、1次スペックルの粒度を決める光学パラメータと粒度の関係を明らかにすることができれば、スペックルの低減効果について議論することができる。実際には、第2章によって得られた光学系の倍率およびF ナンバーと粒度の関係をもとに、これらパラメータの組合せによって得られるスペックルコントラストを導出した。この結果、典型的な光学系では16倍程度の拡大倍率までスペックルの低減効果が有効であることを示した。

さらにこれ以上の拡大倍率を必要とする場合は他のスペックル低減方式と組み合わせる必要がある。小型拡散板方式は、1次スペックルを揺動し、スクリーンにて発生する2次スペックルを時間的に平均化することを狙った方式であった。これに組み合わせスペックル低減を狙うためには、発生する2次スペックルを空間的に平均化させればよいと考えられる。すなわち、異なるパターンを持つ複数の2次スペックルを同時に発生させ、それらの強度が足しあわされた結果、スペックルの砂地模様が平均化され低減することを狙ったものである。このためには、互いに干渉しないパターンを発生させ、かつそれらパターンが互いに無相関であればよい。具体的な方法としては、スクリーンにおいて偏光解消させS偏光およびP偏光それぞれで異なるスペックルパターンを発生させるか、複数波長のレーザー光を用いることによって異なるスペックルパターンを発生させることが考えられる。

第4章は結論である。

論文審査結果の要旨

リアプロジェクションディスプレイの光源としてレーザーを用いることによって、発光効率の向上、光学系の小型化、表示色範囲の拡大などが期待されている。しかしレーザー光源はスクリーンなどの拡散板によってスペックルと呼ばれる砂地模様の明暗パターンが発生し表示品位を著しく低下させるので、この問題の解決が強く望まれている。しかし、スペックル発生の詳細な機構は明らかにされておらず、明確な解決法が確立されていない。本論文はこの問題を解決するために、スペックルの発生機構を解明し、その低減を試みたものであり、全編4章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べている。

第2章では、スペックルの発生機構について検討している。光学系としては、スペックル低減に最も実用的で有効な方式の一つとして考えられている小型拡散板をマイクロディスプレイデバイスと共役な位置に配置し、これを揺動させる方式を基本として取り上げている。まず、2つの拡散点から拡散された光が空中に多数の干渉輝点を発生させることを示し、次いで拡散点の数を無数に増やした拡張モデルを構築し、これを空中輝点モデルと名付けている。また、詳細な観測結果から、このモデルの妥当性を明らかにしている。さらに、小型拡散板で発生する1次スペックルとスクリーンで発生する2次スペックルの存在を明らかにすると共に、スペックルの明暗パターンが光の位相変化と対応していることを明らかにしている。また、1次スペックルパターンは光学系の倍率およびレンズのF値が大きいほど粗くなることを理論と実験によって明らかにしている。このように物理モデルに基づいてスペックルパターンの発生機構を初めて解明し、パターンの粗さ（粒度）と光学系との関係を明らかにした成果は高く評価される。

第3章では、第2章の結果を応用し、小型拡散板方式において拡散板を揺動した際のスペックル低減効果について検討している。この方式は、小型拡散板の1次スペックルパターンがスクリーンの拡散と重畳して2次スペックルパターンが時間的に平均化されて低減されることをねらったものである。実験の結果、1次スペックルが細かい場合は所期の効果が得られるが、粗くなると効果が得られなくなることとを明らかにしている。この原因を検討し、1次スペックルの位相パターンが粗くなると揺動してもスクリーンによる2次スペックルのパターンは大きく変化しなくなること、このためにスペックル低減機能が低下することなどを明らかにしている。すなわち、2次スペックルのコントラストは1次スペックルの粒度を用いて統一的に議論できることを示し、それに基づいて小型揺動拡散板方式のスペックル低減効果の限界を明らかにしている。具体的には、典型的な光学系では16倍程度の拡大倍率までしか有効でないこと、これ以上の拡大倍率を必要とする場合は他のスペックル低減方式と組み合わせる必要があることなどを明らかにしている。これらは応用上極めて有用な知見である。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、レーザー光源を用いたリアプロジェクションディスプレイにおけるスペックルの物理的発生機構を解明し、これを用いてスペックル低減の原理ならびにそのために必要な光学系の条件について明らかにしたものであり、画像工学ならびに電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。